

基于智能算法的数据中心空调系统优化控制研究

李闻闻

中憬科技集团有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]针对数据中心空调系统控制精度欠佳、能耗高、动态响应滞后等突出问题,文章对数据中心空调系统的热力学特性与运行机理进行了深入的分析,在此基础上引入改进粒子群算法(IPSO)与长短期记忆网络(LSTM)策略。研究结果表明,所构建的混合智能优化控制策略,能够在确保数据中心室内温度完全契合IT设备运行要求的前提下提升控制精度,降低空调系统能耗,帮助数据中心实现节能降耗、提质增效的目标。

[关键词]数据中心;空调系统;智能算法;优化控制;能耗优化

DOI: 10.33142/ec.v9i1.18865

中图分类号: TU834

文献标识码: A

Research on Optimization Control of Data Center Air Conditioning System Based on Intelligent Algorithm

LI Wenchuang

Zhongjing Technology Group Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: In response to prominent problems such as poor control accuracy, high energy consumption, and delayed dynamic response in data center air conditioning systems, this article conducts an in-depth analysis of the thermodynamic characteristics and operating mechanisms of data center air conditioning systems. Based on this, improved particle swarm optimization algorithm (IPSO) and long short-term memory network (LSTM) strategies are introduced. The research results indicate that the constructed hybrid intelligent optimization control strategy can improve control accuracy, reduce air conditioning system energy consumption, and help data centers achieve energy-saving, consumption reducing, and efficiency improving goals while ensuring that the indoor temperature of the data center fully meets the operational requirements of IT equipment.

Keywords: data center; air conditioning system; intelligent algorithm; optimization control; energy consumption optimization

引言

随着数字经济快速发展,数据中心作为承载算力存储与数据处理的核心设施,规模和数量不断扩张,能耗问题愈发突出。其中,空调系统能耗是数据中心节能降耗的关键。同时,数据中心IT设备运行对室内环境要求严苛,温度、湿度及波动范围都有明确限制,否则会影响设备运行稳定性、增加故障的发生概率。在传统数据中心的建设与运营中,空调系统作为维持IT设备正常运行的重要组成部分多采用常规控制方法,如PID控制、模糊控制等,然而,常规控制方法难以适应数据中心IT负载波动等动态干扰因素,系统会出现响应滞后的现象,未能根据环境变化,合理调整控制策略。此外,容易出现超调量大等问题,影响空调系统的运行效率,提高了能耗成本。智能算法具有强大的自学习能力、全局寻优能力、自适应等优势,为数据中心空调系统的优化控制带来了新的契机,有助于提高空调系统的运行稳定性与效率,处理复杂非线性系统的优化控制问题。目前,已有部分学者在数据中心空调系统控制中实施单一智能算法,但是这种单算法存在收敛速度慢、预测精度不足等不足。因此,提出改进粒子群算法与长短期记忆网络相结合的混合智能控制策略,降低数据中心空调系统能耗,

提升温度控制精度与系统动态响应能力,契合“双碳”战略下绿色数据中心建设的发展需求。

1 数据中心空调系统机理分析

1.1 空调系统组成结构

由冷却侧、送风侧、室内环境监测系统组成数据中心空调系统,如图1所示。

1.2 关键影响参数识别

通过对空调系统运行机理的分析,识别出影响空调系统能耗与控制效果的关键参数。如表1所示。

2 数据中心空调系统多目标优化模型构建

2.1 模型构建原则

数据中心空调系统模型构建遵循以下原则:(1)多目标平衡原则:在空调系统设计的过程中需要充分考虑能耗优化与环境控制效果,要严格确保室内温湿度可以满足IT设备运行要求,同时实现空调系统能耗的最小化。(2)实用性原则:基于空调系统的实际运行机理构建模型,在参数的设置方面,要与实际空调系统的环境参数、设备性能参数等保持高度一致。(3)约束合理性原则:充分考量数据中心在环境控制、设备运行、能源供应等多方面的规范要求,对于所涉及到的各类场景进行合理、科学的约束条件设置。

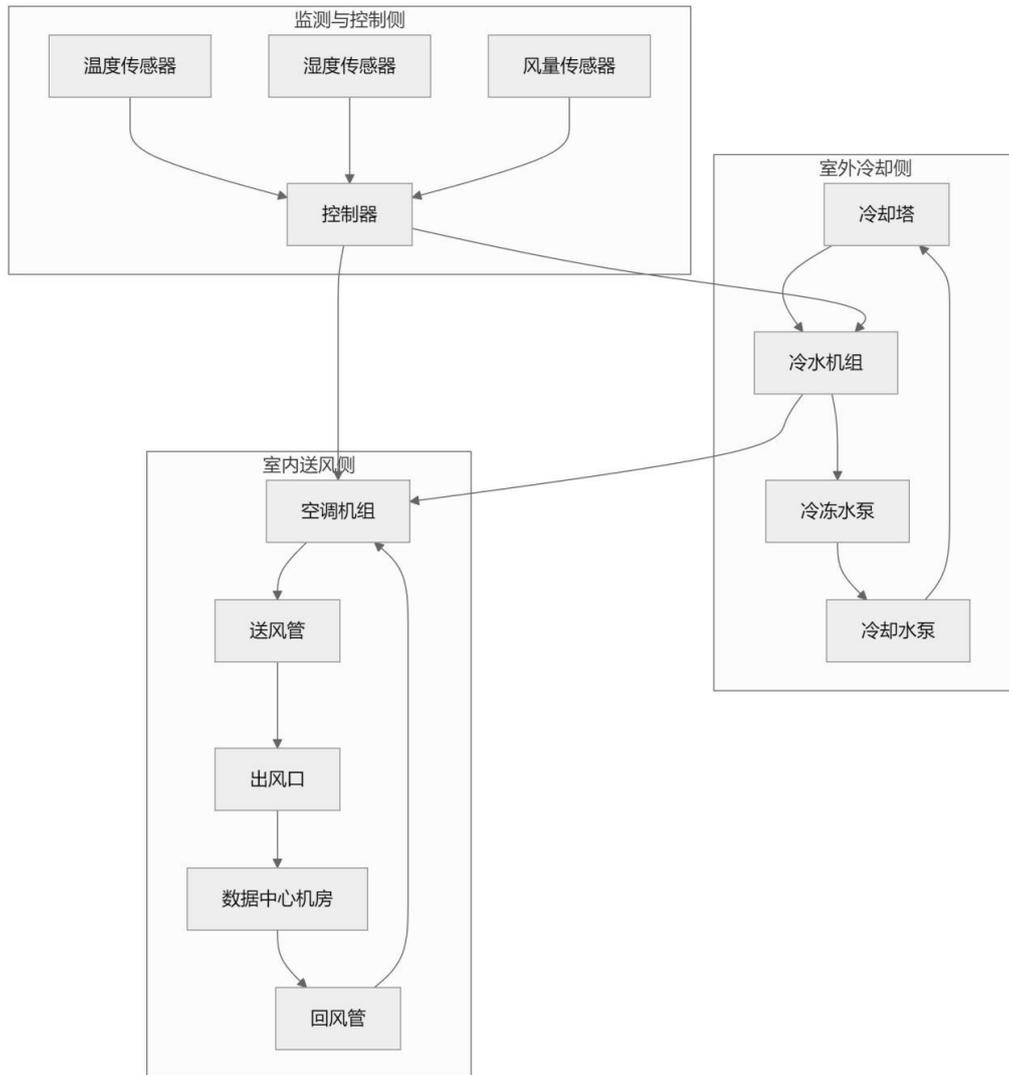


图 1 数据中心空调系统组成结构示意图

表 1 空调系统关键参数特性及影响关系表

参数类型	参数名称	参数特性	主要影响
输入参数	室外温湿度	随机波动, 不可控	影响冷水机组 COP, 增加制冷能耗
	IT 设备负载功率	动态变化, 与业务量正相关	决定室内散热量, 影响制冷需求
	冷却塔风机转速	可调节, 0%~100%额定转速	影响冷却水温度, 间接影响制冷效率
输出参数	室内温度	需稳定在 20~25℃	影响 IT 设备运行稳定性
	空调系统能耗	可量化, 与控制参数正相关	反映系统运行效率, 是优化核心目标
	冷水机组 COP	可量化, 越大效率越高	影响空调系统整体能耗
约束参数	室内湿度	需稳定在 40%~60%	防止 IT 设备受潮

2.2 目标函数设计

2.2.1 主目标函数 (能耗最小化)

数据中心空调系统的总能耗计算公式:

$$E_{total} = E_{ch} + E_{ct} + E_{fan} \quad (1)$$

式中, E_{total} 为空调系统总能耗 ($\text{kW}\cdot\text{h}$); E_{ch} 为冷水机组能耗 ($\text{kW}\cdot\text{h}$); E_{ct} 为冷却塔能耗 ($\text{kW}\cdot\text{h}$); E_{fan} 为空调

机组送风机能耗 ($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

各部分能耗的具体计算模型如下:

(1) 冷水机组能耗: 冷水机组能耗与制冷量、COP 相关, 计算公式:

$$E_{ch} = \frac{Q_{ch}}{COP_{ch}} \times t \quad (2)$$

式中, Q_{ch} 为冷水机组制冷量 (kW); COP_{ch} 为冷水

机组性能系数； t 为运行时间（h）。

(2) 冷却塔能耗：冷却塔能耗与风机转速的三次方近似正相关，计算公式：

$$E_{ct} = P_{ct0} \times \left(\frac{n_{ct}}{n_{ct0}}\right)^3 \times t \quad (3)$$

式中， P_{ct0} 为冷却塔风机额定功率（kW）； n_{ct} 为冷却塔风机实际转速（r/min）； n_{ct0} 为冷却塔风机额定转速（r/min）。

(3) 空调机组送风机能耗：送风机能耗与送风量的三次方近似正相关，计算公式：

$$E_{fan} = P_{fan0} \times \left(\frac{V_{fan}}{V_{fan0}}\right)^3 \times t \quad (4)$$

式中， P_{fan0} 为送风机额定功率（kW）； V_{fan} 为实际送风量（ m^3/h ）； V_{fan0} 为额定送风量（ m^3/h ）。

因此，主目标函数可表示为：

$$\min E_{total} = \left(\frac{Q_{ch}}{COP_{ch}} + P_{ct0} \times \left(\frac{n_{ct}}{n_{ct0}}\right)^3 + P_{fan0} \times \left(\frac{V_{fan}}{V_{fan0}}\right)^3\right) \times t \quad (4)$$

2.2.2 副目标函数（温度波动最小化）

副目标函数以室内温度与设定温度的偏差平方和最小化为目标，计算公式：

$$\min \Delta T = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{set})^2 \quad (5)$$

式中， ΔT 为温度偏差平方和； T_i 为第 i 个监测点的实际温度（ $^{\circ}C$ ）； T_{set} 为室内温度设定值（本文取 $23^{\circ}C$ ）； n 为温度监测点数量。

2.3 约束条件设定

结合数据中心空调系统的运行规范与设备性能，设置以下约束条件：

(1) 室内温度约束：室内各监测点温度需在 $20 \sim 25^{\circ}C$ 范围内，公式：

$$20 \leq T_i \leq 25 (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

(2) 室内湿度约束：室内相对湿度需在 $40\% \sim 60\%$ 范围内，公式：

$$40\% \leq \varphi \leq 60\% \quad (7)$$

其中， φ 为室内相对湿度。

(3) 控制参数约束：

①送风量约束：送风量需在额定风量的 $50\% \sim 100\%$ 范围内，公式：

$$0.5V_{fan0} \leq V_{fan} \leq V_{fan0} \quad (7)$$

②冷水机组供水温度约束：供水温度需在 $7 \sim 12^{\circ}C$ 范围内，公式：

$$7 \leq T_{ch,s} \leq 12 \quad (8)$$

其中， $T_{ch,s}$ 为冷水机组供水温度（ $^{\circ}C$ ）。

③冷却塔风机转速约束：风机转速需在额定转速的 $30\% \sim 100\%$ 范围内，公式：

$$0.3n_{ct0} \leq n_{ct} \leq n_{ct0} \quad (9)$$

(4) 设备性能约束：冷水机组 COP 需大于等于 3.5，确保冷水机组高效运行，公式：

$$COP_{ch} \geq 3.5 \quad (10)$$

2.4 模型标准化处理

由于主目标函数（能耗）与副目标函数（温度波动）的量纲不同，直接进行多目标优化会导致优化结果偏差，因此采用线性归一化方法，对目标函数进行标准化处理，标准化公式为：

$$f'(x) = \frac{f_{max}(x) - f(x)}{f_{max}(x) - f_{min}(x)} \quad (11)$$

其中， $f'(x)$ 为标准化后的目标函数值； $f(x)$ 为目标函数原始值； $f_{max}(x)$ 为目标函数最大值； $f_{min}(x)$ 为目标函数最小值。

标准化使多目标优化模型转为单目标，用加权求和法结合主、副目标函数，权重按数据中心需求确定。本文 $\omega_1=0.7$ ，副目标函数权重 $\omega_2=0.3$ ，综合目标函数公式如下：

$$\min F(x) = \omega_1 E'_{total} + \omega_2 \Delta T' \quad (12)$$

其中， E'_{total} 为标准化后的总能耗； $\Delta T'$ 为标准化后的温度偏差平方和。

3 基于混合智能算法的优化控制策略设计

3.1 长短期记忆网络（LSTM）参数预测模型

3.1.1 LSTM 网络结构

本文构建的 LSTM 参数预测模型主要用于预测 IT 设备负载功率与室外温湿度，其预测精度直接关系到优化控制策略的性能。LSTM 参数预测模型的结构如图 2 所示。

3.1.2 模型训练与优化

LSTM 参数预测模型的训练步骤如下：（1）采集数据中心近 6 个月每小时的 IT 设备负载功率、室外温湿度历史时序数据，经异常值剔除、缺失值填充、归一化后，按 7:3 划分训练集与测试集；（2）输入层神经元数设为 3（对应 3 个输入参数），隐藏层 LSTM 单元数 64，输出层神经元数 3（对应 3 个预测参数），学习率 0.001，迭代 100 次，batch size 为 32；（3）模型训练：将训练集输入 LSTM 网络，用反向传播算法调参，最小化 MSE；（4）模型验证：用测试集验证预测精度，不满足则调整参数（如隐藏层单元数、学习率）并重新训练，直至达标。

预测精度评价指标采用均方误差（MSE）与平均绝对误差（MAE），计算公式：

$$MSE = 1/m \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (13)$$

$$MAE = 1/m \sum_{i=1}^m |y_i - \hat{y}_i| \quad (14)$$

其中， m 为测试集样本数量； y_i 为第 i 个样本的实际值； \hat{y}_i 为第 i 个样本的预测值。MSE 与 MAE 越小，说明模型预测精度越高。

3.2 改进粒子群算法（IPSO）优化求解

3.2.1 传统粒子群算法缺陷

传统粒子群算法（PSO）算法收敛速度慢，在迭代后期，粒子的速度逐渐减小，易陷入局部最优解，此外，权重系数固定，难平衡全局与局部搜索能力。

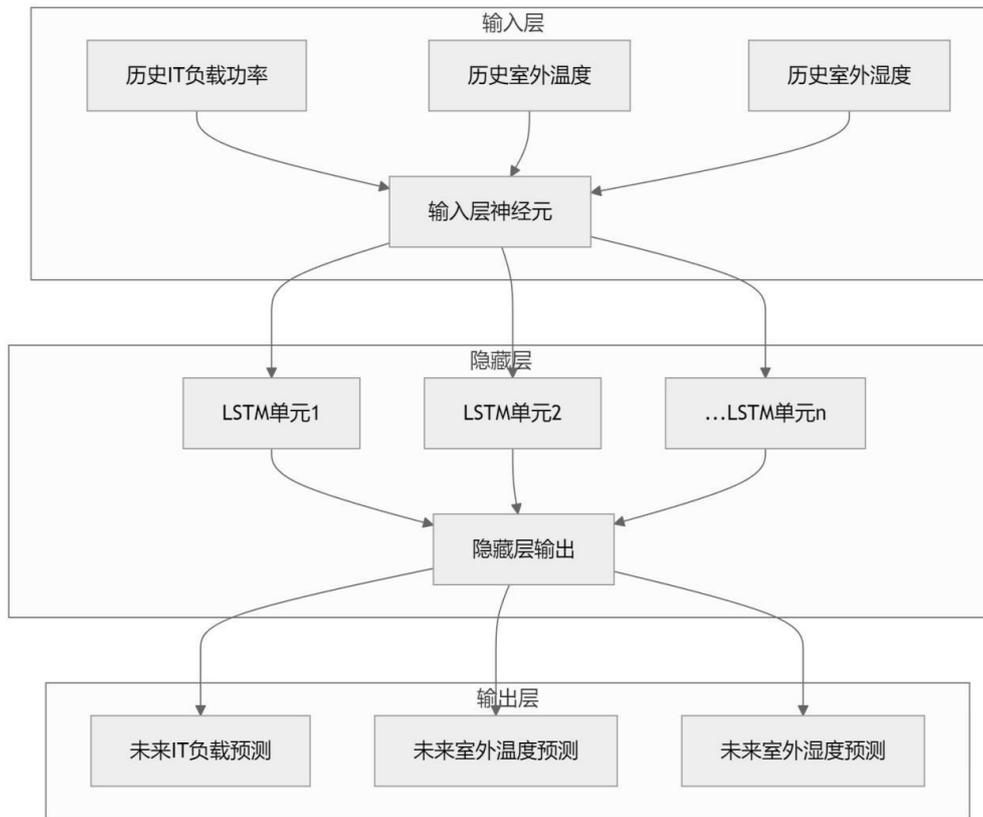


图 2 LSTM 参数预测模型结构示意图

3.2.2 改进粒子群算法设计

本文从权重系数改进与速度更新策略改进两个方面:

(1) 权重系数改进: 采用自适应权重系数策略, 前期增大权重系数, 后期减小权重系数, 提高优化精度。自适应权重系数计算公式:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \times ite \quad (15)$$

其中, w 为自适应权重系数; w_{max} 为最大权重系数(本文取 0.9); w_{min} 为最小权重系数(本文取 0.4); $iter_{max}$ 为最大迭代次数; ite 为当前迭代次数。

(2) 速度更新策略改进: 引入惯性因子与学习因子自适应调整项, 使粒子的速度更新更具灵活性, 改进后的速度更新公式公式:

$$v_{i,d}^{iter+1} = w \times v_{i,d}^{iter} + c_1 \times r_1 \times (pbest_{i,d} - x_{i,d}^{iter}) + c_2 \times r_2 \times (gbest_d - x_{i,d}^{iter}) \quad (16)$$

其中, 第 i 个粒子在第 d 维的速度; $v_{i,d}^{iter}$ 为第 $iter$ 次迭代时, 第 i 个粒子在第 d 维的速度; c_1 、 c_2 为学习因子, 随迭代次数自适应调整 (c_1 从 2.5 线性减小至 0.5, c_2 从 0.5 线性增大至 2.5); r_1 、 r_2 为 0~1 之间的随机数; $pbest_{(i,d)}$ 为第 i 个粒子的个体最优位置在第 d 维的分量; $gbest_d$ 为群体最优位置在第 d 维的分量; $x_{i,d}^{iter}$ 为第 $iter$ 次迭代时, 第 i 个粒子在第 d 维的位置。

粒子位置更新公式保持不变, 公式:

$$x_{i,d}^{iter+1} = x_{i,d}^{iter} + v_{i,d}^{iter+1} \quad (17)$$

3.2.3 IPSO 算法优化求解步骤

利用 IPSO 算法求解数据中心空调系统多目标优化模型的步骤如下: 设置粒子种群规模 $N=50$, 最大迭代次数 $Tmax=100$, 粒子维度 $D=3$ (对应送风量、冷水机组供水温度、冷却塔风机转速), 定义各控制参数取值范围 (满足优化模型约束)。以 LSTM 预测的 IT 设备负载功率、室外温湿度为输入, 代入多目标优化模型, 计算每个粒子的综合目标函数值。对每个粒子, 比较当前适应度与个体最优适应度 ($pbest$)。若当前更优, 则更新 $pbest$ 的位置和适应度值。比较所有粒子的 $pbest$ 与群体最优适应度 ($gbest$)。若存在更优的 $pbest$, 则更新 $gbest$ 的位置和适应度值。根据改进后的速度更新公式和位置更新公式, 更新粒子速度和位置, 确保位置满足约束条件。若达到最大迭代次数, 或 $gbest$ 适应度值变化量小于阈值 (10^{-4}), 则停止迭代并输出 $gbest$ (最优控制参数)。

3.3 混合智能优化控制策略整体流程

基于 LSTM 与 IPSO 的流程如下: 通过监测系统采集空调运行及环境参数 (室内温湿度、IT 负载功率、室外温湿度、系统能耗等), 将历史时序数据输入训练好的 LSTM 模型, 预测未来 1h 的 IT 负载功率、室外温湿度, 将预测参数代入多目标优化模型, 利用 IPSO 算法

求解,输出最优控制参数,控制器下发最优参数至空调设备,调整运行状态。实时监测调整后的室内温湿度及能耗,若偏差超限则重启预测与优化流程,形成闭环控制。

4 结论

所构建的 LSTM-IPSO 混合智能优化控制策略解决了传统 PSO 算法收敛慢、易陷入局部最优的缺陷,能够在确保数据中心室内温度完全契合 IT 设备运行要求的前提下,提升控制精度,降低空调系统能耗,帮助数据中心实现节能降耗、提质增效的目标。

[参考文献]

[1]胡玮.基于 Trnsys 的中央空调系统节能控制研究[D].广

东:华南理工大学,2012.

[2]李建维.中央空调水系统节能运行优化技术研究[D].陕西:西安建筑科技大学,2016.

[3]秦洪德,石丽丽.一种新型的被动启发式粒子群优化算法[J].哈尔滨工程大学学报,2010,31(10):1298-1302.

[4]周亮.变风量空调系统解耦优化方法研究[D].辽宁:沈阳建筑大学,2016.

作者简介:李闻闯(1993.11—),毕业院校:华北电力大学科技学院,所学专业:建筑环境与能源应用工程,当前就职单位:中憬科技集团有限公司,职务:暖通工程师,职称级别:中级。